

B schreibung**Verfahren zum Herstellen einer Nanoelement-Anordnung und Nanoelement-Anordnung**

5

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Herstellen einer Nanoelement-Anordnung und eine Nanoelement-Anordnung.

Die herkömmliche Silizium-Mikroelektronik wird bei weiter voranschreitender Verkleinerung an ihre Grenzen stoßen. Bei einem Feldeffekttransistor nehmen mit fortgesetzter Miniaturisierung störende Kurzkanal-Effekte zu, welche die Leitungsfähigkeit des Feldeffekttransistors einschränken. Zu den Problemen, die bei einem einzelnen Bauelement auftreten, kommt bei einer Speicheranordnung noch eine begrenzte Skalierbarkeit des Speichermediums hinzu, beispielsweise kann die Kapazität in einem DRAM ("dynamic random access memory") nicht beliebig skaliert werden.

Als mögliche Nachfolgetechnologie für die Silizium-Mikroelektronik wird die Verwendung von Kohlenstoffnanoröhren diskutiert. Grundlagen über Kohlenstoffnanoröhren sind beispielsweise in [1] beschrieben. Es ist bekannt, dass Kohlenstoffnanoröhren (in Abhängigkeit von den Röhren-Parametern) ein von halbleitend bis metallisches elektrisches Leitfähigkeitsverhalten aufweisen.

Kohlenstoffnanoröhren ("carbon nanotubes") werden wegen ihrer elektrischen Eigenschaften nicht nur als mögliche Alternative zu herkömmlichen aktiven Elementen wie Feldeffekttransistoren, Dioden, etc., sondern aufgrund ihrer großen Stromtragfähigkeit und geringer Dimension im Bereich von Nanometern als Ersatz für herkömmliches Metallisierungsmaterial (Aluminium, Kupfer, etc.) untersucht. Da bei der Kopplung elektrischer Schalterelemente in einem Schaltkreis nicht nur einfache Punkt-zu-Punkt-Leiterbahnen, sondern auch Verzweigungen elektrischer Leitungen zu

realisieren sind, besteht ein Bedarf, Verzweigungen von Strompfaden unter Verwendung von Kohlenstoffnanoröhren zu ermöglichen.

- 5 Aus [2] ist bekannt, eine Y-förmige Verzweigung von Kohlenstoffnanoröhren dadurch zu realisieren, dass ein Katalysatormaterial-Spot in einem Endabschnitt eines Y-förmigen Kanals in einem Aluminiumoxid-Templat (Al_2O_3) ausgebildet wird. Nachfolgend wird gemäß [2] ausgehend von
10 dem Katalysatormaterial-Spot eine Y-förmig verzweigte Kohlenstoffnanoröhre in dem Kanal mittels Pyrolyse von Azetylen ausgebildet.

- Allerdings ist das aus [2] bekannte Verfahren auf das
15 Ausbilden von verzweigten Kohlenstoffnanoröhren im Inneren eines Templats beschränkt.

- Stellenweise kann sich bei der Synthese von Kohlenstoffnanoröhren, beispielsweise unter Verwendung eines
20 CVD-Verfahrens ("Chemical Vapour Deposition"), zufällig eine Verzweigung von Kohlenstoffnanoröhren ergeben. Allerdings ist das räumlich definierte Ausbilden von Verzweigungen von Kohlenstoffnanoröhren gemäß diesem Verfahren nicht steuerbar.

- 25 Aus [3] ist bekannt, auf einem Substrat Eisen-Cluster vorgegebener Dimension abzuschneiden, und ausgehend von den für das Aufwachsen von Kohlenstoffnanoröhren katalytisch wirksamen Eisen-Clustern unter Verwendung eines CVD-Verfahrens Kohlenstoffnanoröhren aufzuwachsen. Der
30 Durchmesser der Kohlenstoffnanoröhren ist mittels Vorgebens des Durchmessers der Cluster einstellbar.

- [4] offenbart ein Verfahren, gemäß welchem Metall-Cluster aus 3d-Übergangsmetallen hergestellt werden können.

- 35 [5] offenbart ein Aufwachs-Modell für Dendriten von Kohlenstoffnanoröhren.

[6] offenbart das Aufwachsen von Kohlenstoffnanofibern unter magnetischer Kraft mittels eines CVD-Verfahrens.

5 [7] offenbart einen Aufwachsmechanismus von Y-Verbindungs-Kohlenstoffnanoröhren.

[8] offenbart Y-Verbindungs-Kohlenstoffnanoröhren, gewachsen mittels eines verdampften Kupfer-Katalysators.

10

Der Erfindung liegt das Problem zugrunde, ein anderes Verfahren zum Herstellen einer Nanoelement-Anordnung und eine andere Nanoelement-Anordnung anzugeben, bei denen Verzweigungen von Nanoelementen vorgebbar sind.

15

Das Problem wird durch ein Verfahren zum Herstellen einer Nanoelement-Anordnung und durch eine Nanoelement-Anordnung mit den Merkmalen gemäß den unabhängigen Patentansprüchen gelöst.

20

Bei dem Verfahren zum Herstellen einer Nanoelement-Anordnung wird ein erstes, bereits fertig hergestelltes, Nanoelement zumindest teilweise mit Katalysatormaterial zum Katalysieren des Aufwachsens von Nanoelementen bedeckt. Nachfolgend wird
25 auf dem Katalysatormaterial mindestens ein zweites Nanoelement aufgewachsen.

30

Die Nanoelement-Anordnung der Erfindung enthält ein erstes Nanoelement, das zumindest teilweise mit Katalysatormaterial zum Katalysieren des Aufwachsens von Nanoelementen bedeckt ist. Ferner enthält die Nanoelement-Anordnung mindestens ein zweites Nanoelement, das auf dem Katalysatormaterial aufgewachsen ist.

35

Eine Grundidee der Erfindung ist darin zu sehen, dass mittels Bedeckens definiert vorgegebbarer Teilbereiche eines ersten bereits fertig hergestellten Nanoelements eine Stelle oder

mehrere Stellen auf dem ersten Nanoelement vorgebar ist oder sind, auf welcher oder welchen bevorzugt mindestens ein zweites Nanoelement aufwachsbar ist. Diese Stellen können dadurch vorgegeben werden, dass das Katalysatormaterial

5 gezielt auf gewünschten Bereichen des ersten Nanoelements abgeschieden wird. Da das Katalysatormaterial eine für das Aufwachsen von Nanoelementen katalytische Wirkung aufweist, erfolgt bei einem nachfolgenden Verfahrensschritt zum

10 Ausbilden von zweiten Nanoelementen ein Aufwachsen der zweiten Nanoelemente bevorzugt auf den Katalysator-Bereichen auf dem ersten Nanoelement. Da es technologisch möglich ist, Cluster aus 3d-Übergangsmetallen mit gezielter Dimension im Nanometer-Bereich herzustellen, und da viele 3d-

15 Übergangsmetalle (z.B. Eisen, Kobalt, Nickel) zum Beispiel das Ausbilden von Kohlenstoffnanoröhren katalytisch unterstützen, ist ein hochgenaues Definieren von Aufwachsstellen von zweiten Nanoelementen auf der Oberfläche eines ersten Nanoelements ermöglicht.

20 Erfindungsgemäß ist zum Herstellen verzweigter Netzwerke von Nanoelementen ein Substrat entbehrlich.

Ferner sind komplexe Vielfachverzweigungen von Nanoelementen entsprechend den Anforderungen einer jeweiligen Anwendung,

25 z.B. eines integrierten Schaltkreises mit verzweigten Leiterbahnen, möglich.

Die Erfindung beruht auf der experimentellen Erkenntnis, dass Katalysatormaterial, zum Beispiel in Form metallischer

30 Cluster, besonders gut an Nanoelementen, wie beispielsweise Kohlenstoffnanoröhren, anhaftet, so dass eine sichere Möglichkeit geschaffen ist, die Stellen des späteren Aufwachsens eines zweiten Nanoelements vorzugeben und ein dauerhaftes Anhaften des Katalysatormaterials zu

35 gewährleisten. Beispielsweise kann ein Kobalt-Cluster von einer Monoschicht eines organischen Materials umgeben sein,

welche Monoschicht mit Kohlenstoffnanoröhren eine gute Haftwirkung aufweist.

Da Katalysatormaterial zum Aufwachsen von Nanoelementen in vielen Fällen elektrisch gut leitfähig ist (beispielsweise 3d-Übergangsmetalle wie Eisen, Kobalt oder Nickel), ist eine elektrisch leitfähige Kopplungsstelle zwischen den Nanoröhren ermöglicht. Somit kann eine durchgehende leitfähige Verbindung zwischen den beispielsweise elektrisch leitfähigen Nanoelementen und dem Katalysatormaterial als Kopplungsmittel realisiert werden.

Bevorzugte Weiterbildungen der Erfindung ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen.

Das Katalysatormaterial kann auf dem ersten Nanoelement in Gestalt von mindestens einem Cluster aufgebracht werden. Das Herstellen derartiger Cluster aus 3d-Übergangsmetallen kann gemäß den in [3] oder [4] beschriebenen Verfahren erfolgen. Mittels Einstellens der Größe der metallischen Cluster kann sichergestellt werden, ob auf dem jeweiligen Cluster eines oder mehrere zweite Nanoelemente aufgewachsen werden können bzw. welchen Durchmesser und somit welche elektrischen Eigenschaften das aufzuwachsende zweite Nanoelement haben soll. Ferner können derartige Cluster beispielsweise von einer dünnen Schicht aus organischem Material zum Beispiel Tenside umgeben sein, wodurch das Ankoppeln der Cluster an die ersten und zweiten Nanoelemente erleichtert ist.

Das Katalysatormaterial kann auf dem ersten Nanoelement aufgebracht werden, indem das erste Nanoelement in einer Suspension mit Clustern aus Katalysatormaterial in Wirkkontakt gebracht wird, und nachfolgend das erste Nanoelement mit mindestens einem daran angelagerten Cluster aus der Suspension entfernt wird. Werden fertige erste Nanoelemente in eine Suspension aus Clustern eingebracht, so binden die Cluster mit der Oberfläche der Nanoelemente quasi

von selbst. Dadurch ist ein einfaches Verfahren zum Ausbilden von Clustern auf der Oberfläche der ersten Nanoelemente geschaffen.

- 5 Das erste Nanoelement kann mit dem mindestens einen daran angelagerten (bzw. chemisch oder physikalisch gebundenen) Cluster resuspendiert werden und auf einem Substrat aufgebracht werden. Mit anderen Worten kann das erste Nanoelement, an dem einer oder mehrere Cluster angebracht ist
10 oder sind, in einer geeigneten Lösung/Suspension resuspendiert werden, und beispielsweise unter Verwendung einer Pipette/Mikropipette oder mittels Aufsprühens auf ein beliebiges Substrat aufgebracht werden.
- 15 Das erste Nanoelement mit dem mindestens einen daran angelagerten Cluster kann einem Verfahrensschritt zum Ausbilden des mindestens einen zweiten Nanoelements unterzogen werden, derart, dass das mindestens eine zweite Nanoelement an dem mindestens einen Cluster aufgewachsen
20 wird. Die Cluster bilden aufgrund ihrer Katalysatorfunktion anschaulich eine Keimstelle für das Aufwachsen eines zweiten Nanoelements, wodurch ein zweites Nanoelement auf dem ersten Nanoelement aufwächst.
- 25 Zum Ausbilden des mindestens einen zweiten Nanoelements auf dem Katalysatormaterial-Cluster des ersten Nanoelements wird vorzugsweise ein CVD-Verfahren ("Chemical Vapour Deposition") eingesetzt. Hierfür kann beispielsweise Azetylen in eine CVD-Verfahrenskammer eingeleitet werden, wodurch das Ausbilden
30 des zweiten Nanoelements in Gang gesetzt wird. Dieses wird infolge der für das Aufwachsen von Nanoelementen katalytischen Wirkung vorzugsweise auf dem ersten Nanoelement aufgewachsen.
- 35 Das Katalysatormaterial zwischen dem ersten und dem mindestens einen zweiten Nanoelement kann anschließend vernickelt werden, d.h. zumindest an der Oberfläche mit

Nickelmaterial versehen werden. Zur Verbesserung eines elektrischen Übergangswiderstandes an der Verzweigung zwischen einem ersten und einem zweiten Nanoelement kann beispielsweise bei Verwendung von Eisen-Material als

5 Katalysatormaterial eine durch das bereits vorhandene Eisen-Material katalysierte nasschemische stromlose Vernickelung am Verzweigungspunkt durchgeführt werden, um die elektrischen Eigenschaften des Verzweigungspunkts zu verbessern.

10 Ein Teilbereich des ersten Nanoelements kann mit einer Schutzschicht bedeckt werden, die vorzugsweise von einer für das Aufwachsen von Nanoelementen katalytischen Wirkung frei ist. Anders ausgedrückt ist das Material der Schutzschicht vorzugsweise so gewählt, dass Nanoelemente auf der

15 Schutzschicht nicht oder nur in geringfügigem Maße aufwachsen können. In einem solchen Fall ist ein Aufwachsen von Nanoelementen in nennenswerter Menge nur dort möglich, wo das erste Nanoelement von der Schutzschicht frei ist. Mittels Bedeckens eines Teilbereichs des ersten Nanoelements mit

20 einer derartigen Schutzschicht, beispielsweise unter Verwendung eines Lithographie- und eines Ätz-Verfahrens, können definiert Oberflächenbereiche des Nanoelements freigelegt werden, auf denen Katalysatormaterial-Cluster aufgebracht werden können. Wird dann die Schutzschicht

25 entfernt, so verbleiben Katalysatormaterial-Spots lediglich an den vorgegebenen Oberflächenbereichen des ersten Nanoelements. Dadurch erfolgt ein Aufwachsen von zweiten Nanoelementen nur auf solchen Oberflächenbereichen, die zuvor von einer Bedeckung der Schutzschicht frei waren und die mit

30 Katalysatormaterial-Spots bedeckt sind. Dadurch ist ein besonders gutes räumliches Definieren derjenigen Bereiche auf dem ersten Nanoelement möglich, auf denen ein zweites Nanoelement aufgewachsen werden kann. Es ist auch möglich, die Schutzschicht erst nach dem Aufwachsen des mindestens

35 einen zweiten Nanoelements zu entfernen.

Als Schutzschicht kann beispielsweise Lack, zum Beispiel ein

Photolack, ein Tensid, ein anderes organisches Material, ein oxidiertes Material oder ein von einer für das Aufwachsen von Nanoelementen katalytischen Wirkung freies Metall, beispielsweise Gold-Material, verwendet werden.

5

Als Katalysatormaterial können beispielsweise Eisen, Kobalt oder Nickel, eine Kombination der genannten Materialien oder andere 3d-Übergangsmetalle verwendet werden. Es kann eine Legierung von Eisen und/oder Kobalt und/oder Nickel mit Aluminium, Titan, Molybdän und/oder Platin verwendet werden. Die genannten Materialien sind als Katalysatormaterial insbesondere dann vorteilhaft verwendbar, wenn als Nanoelement eine Kohlenstoffnanoröhre verwendet wird.

10

15 Im Weiteren wird die erfindungsgemäße Nanoelement-Anordnung näher beschrieben. Ausgestaltungen des Verfahrens zum Herstellen der Nanoelement-Anordnung gelten auch für die Nanoelement-Anordnung und umgekehrt.

20 Bei der erfindungsgemäßen Nanoelement-Anordnung kann nur ein Teil des ersten Nanoelements mit Katalysatormaterial zum Katalysieren des Aufwachsens von Nanoelementen bedeckt sein. Indem ein anderer Teilbereich des ersten Nanoelements von derartigem Katalysatormaterial frei ist, ist ein gezieltes Vorgeben derjenigen Stellen ermöglicht, auf denen ein zweites Nanoelement aufgewachsen werden kann.

25

Das erste Nanoelement kann in einer in einem Substrat eingebrachten Pore aufgewachsen werden. Auf diese Weise ist es beispielsweise möglich, das erste Nanoelement als vertikales Nanoelement auszubilden, welches sich entlang einer vorzugsweise vertikalen, in einem Substrat eingebrachten Pore erstreckt. Ragt das erste Nanoelement aus der Pore hervor, und ist an dem überstehenden Bereich des Nanoelements ein Katalysatormaterial-Spot ausgebildet, so kann ein zweites Nanoelement auf dem ersten Nanoelement aufgewachsen werden.

30

35

Das erste Nanoelement kann in der Pore auf einer
Metallisierungsebene in dem Substrat aufgewachsen sein. Auf
diese Weise ist es ermöglicht, dass das erste Nanoelement
bereits an einer Metallisierungsebene elektrisch angekoppelt
ist, wobei die Metallisierungsebene wiederum mit einem
integrierten Schaltkreis in dem Substrat gekoppelt sein kann
oder ein Teil davon sein kann. Da das erste Nanoelement bzw.
das zweite Nanoelement vorzugsweise elektrisch leitfähig oder
halbleitend ist, kann eine durchgehende elektrisch leitfähige
Verbindung zwischen dem integrierten Schaltkreis und dem
ersten bzw. dem zweiten Nanoelement geschaffen werden. Dies
ist zum Ausbilden eines integrierten Schaltkreises mit einer
Dimension im Nanometer-Bereich vorteilhaft.

Das erste und/oder das mindestens eine zweite Nanoelement
und/oder mindestens ein zusätzliches Nanoelement können
aufeinander und/oder nebeneinander aufgewachsen sein. Auf
diese Weise kann eine flächige oder eine dreidimensionale
Anordnung von Nanoelementen bereitgestellt werden, so dass
anschaulich ein Netzwerk von Leiterbahnen realisiert werden
kann, welches für viele Anwendungen (beispielsweise
Speicherzellen-Schaltkreise oder Logik-Schaltkreise) geeignet
ist.

Das erste und/oder das mindestens eine zweite Nanoelement
kann eine Nanoröhre, ein Bündel von Nanoröhren oder ein
Nanostäbchen aufweisen. Das Nanostäbchen kann zum Beispiel
Silizium, Germanium, Indiumphosphid, Galliumnitrid,
Galliumarsenid, Zirkoniumoxid und/oder ein Metall aufweisen.
Die Nanoröhre kann beispielsweise eine Kohlenstoffnanoröhre,
eine Kohlenstoff-Bor-Nanoröhre, eine Kohlenstoff-Stickstoff-
Nanoröhre, eine Wolframsulfid-Nanoröhre, oder eine
Chalkogenid-Nanoröhre sein.

Das erste und/oder das mindestens eine zweite Nanoelement
kann beispielsweise eine Kohlenstoffnanoröhre sein. In diesem

Falle sind Eisen, Kobalt und/oder Nickel als Katalysatormaterial bevorzugt. Es kann auch eine Legierung von Eisen und/oder Kobalt und/oder Nickel mit Aluminium, Titan, Molybdän und/oder Platin verwendet werden.

5

Die Nanoelement-Anordnung der Erfindung kann einen integrierten Schaltkreis aufweisen, der mit dem ersten und/oder dem mindestens einen zweiten Nanoelement gekoppelt ist. Somit können die Nanoelemente mit einem integrierten

10 Schaltkreis verschaltet sein, z.B. um eine Ankopplung des integrierten Schaltkreises an miniaturisierte Komponenten zu realisieren.

15 Ferner können bei der Nanoelement-Anordnung die Nanoelemente ein mehrfach verzweigtes Netzwerk bilden. Mit anderen Worten können die miteinander gekoppelten Nanoelemente in beliebig komplexer Weise mehrfach bzw. vielfach verzweigt sein, z.B. um ein erwünschtes Netzwerk elektrischer Leitungen zu bilden.

20 Anschaulich können gemäß der Erfindung bereits fertig hergestellte Kohlenstoffnanoröhren mit einer katalytisch aktiven Metallsuspension derart aktiviert werden, dass von den Partikeln der Metallsuspension ausgehend zusätzliche Nanoröhren verzweigt werden können. Hierbei ist es möglich,

25 bereits ausgebildete Kohlenstoffnanoröhren entweder entlang ihrer kompletten Länge oder nur entlang eines begrenzten Abschnitts zu aktivieren, indem der übrige Bereich unter Verwendung eines Lacks, einer Oxidschicht oder eines katalytisch im Wesentlichen inaktiven Metalls abgedeckt wird.

30

Werden Vias (das heißt Kontaktlöcher zwischen unterschiedlichen Metallisierungsebenen in einem Substrat) mit Kohlenstoffnanoröhren gefüllt, so lässt sich mit dem erfindungsgemäßen Verfahren die Fülldichte des Vias mit

35 Kohlenstoffnanoröhren erhöhen. Hierfür kann beispielsweise das Via mit einer ersten Kohlenstoffnanoröhre, die von einem Katalysatormaterial ummantelt ist, gefüllt werden, und

nachfolgend auf dem Katalysatormaterial auf der ersten Kohlenstoffnanoröhre zweite Kohlenstoffnanoröhre zum Erhöhen der Füllichte des Vias ausgebildet werden.

- 5 Erfindungsgemäß werden Metall-Cluster geeigneter Größe und Reaktivität an bereits ausgebildete erste Kohlenstoffnanoröhren gebunden und nachfolgend einem weiteren Syntheseschritt unterzogen. Dieser Syntheseschritt kann beispielsweise in einem Ofen durchgeführt werden, in den bei
10 300°C bis 1000°C Azetylen, Ethen, oder Methan unter reduziertem oder Atmosphären-Druck eingeleitet wird. Ein CVD-Verfahren ist zum Ausbilden der zweiten Nanoelemente geeignet.
- 15 Die Metall-Cluster, welche das Katalysatormaterial bilden können, können beispielsweise gemäß den aus [3], [4] beschriebenen Verfahren hergestellt werden.

Zum Beispiel können mehrwandige Kohlenstoffnanoröhren als
20 erste Nanoelemente verwendet werden. Diese können unter Verwendung eines CVD-Verfahrens hergestellt sein. Die hergestellten Kohlenstoffnanoröhren können direkt verwendet werden oder zur Verbesserung der Löslichkeit mit einer geeigneten Chemikalie (beispielsweise Natriumhypochlorit,
25 NaOCl) oxidiert werden. Die Kohlenstoffnanoröhren können bei Raumtemperatur mit einer Suspension aus Eisen-Clustern in Toluol behandelt werden. Die Eisen-Cluster können aus Eisenpentacarbonyl ($\text{Fe}(\text{CO})_5$) und Ölsäure (Oleinsäure, (Z)- oder cis-9-Octadecensäure, $\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$) hergestellt werden. Das
30 in Suspension befindliche Kohlenstoffnanoröhren-Material kann abfiltriert und von Lösungsmittelresten befreit werden. Es kann mit Dimethylformamid ($\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}$), resuspendiert werden. Ein Tropfen dieser Lösung kann auf ein Substrat aufgebracht werden oder es kann eine mit Isopropanol verdünnte Lösung
35 aufgesprüht werden. Während dieses Verfahrensschrittes kann ein Teil des Substrats zur Durchführung eines nachfolgenden Liftoff-Strukturierungsverfahrens, beispielsweise mittels

Photolack, abgedeckt sein. Auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass Kohlenstoffnanoröhren nur auf gewünschten Oberflächenbereichen eines Substrats aufgebracht werden. Nach dem Aufbringen der Lösung und einem möglichen
 5 nachfolgenden Liftoff-Verfahren zum Entfernen des Photolacks kann das Substrat nach Trocknung in einen Reaktionsofen gebracht werden. Nachfolgend können zweite Kohlenstoffnanoröhren von der ersten Kohlenstoffnanoröhre aus verzweigt synthetisiert werden. Anschließend kann zur
 10 Verbesserung des elektrischen Übergangswiderstands an einer jeweiligen Verzweigung eine vorzugsweise nasschemische stromlose Vernickelung am Verzweigungspunkt durchgeführt werden.

15 Es ist anzumerken, dass erfindungsgemäß nicht nur Metall-Cluster aus 3d-Elementen, wie Eisen, Kobalt oder Nickel, die aus den entsprechenden Carbonylen hergestellt sind, als Katalysatormaterial verwendet werden können, sondern beispielweise auch solche Cluster, die aus Salzen organischer
 20 Säuren mit Hilfe von Diolen als Reduktionsmittel, dargestellt werden können. Auch sind Legierungen aus oben genannten Metallen mit Al, Ti, Mo, Pd, Pt, Ru, Ph, Os oder Ir möglich

Ausführungsbeispiele der Erfindung sind in den Figuren
 25 dargestellt und werden im weiteren näher erläutert.

Es zeigen:

Figuren 1A, 1B schematische Ansichten von Suspensionen
 30 während eines Verfahrens zum Herstellen von mit Katalysatormaterial-Clustern bedeckten ersten Kohlenstoffnanoröhren gemäß einem Verfahren zum Herstellen einer Nanoelement-Anordnung gemäß einem bevorzugten Ausführungsbeispiel der Erfindung,

35 Figuren 2A, 2B Querschnittsansichten von Schichtenfolgen während des Verfahrens zum Herstellen einer

Nanoelement-Anordnung gemäß dem bevorzugten Ausführungsbeispiel der Erfindung,

Figur 2C eine Querschnittsansicht einer Nanoelement-Anordnung gemäß dem bevorzugten Ausführungsbeispiel der Erfindung,

Figuren 3A bis 3C elektronenmikroskopische Aufnahmen von Nanoelement-Anordnungen gemäß bevorzugten Ausführungsbeispielen der Erfindung.

Gleiche oder ähnliche Komponenten in unterschiedlichen Figuren sind mit gleichen Bezugsziffern versehen.

Die Darstellungen in den Figuren sind schematisch und nicht maßstäblich.

Im Weiteren wird bezugnehmend auf Fig.1A, Fig.1B, Fig.2A bis Fig.2C ein Verfahren zum Herstellen einer Kohlenstoffnanoröhren-Anordnung gemäß einem bevorzugten Ausführungsbeispiel der Erfindung beschrieben.

In **Fig.1A** ist ein Behälter 100 gezeigt, in dem eine Suspension aus Toluol-Lösungsmittel 101 und Eisen-Clustern 102 enthalten ist. Die Eisen-Cluster 102 sind von einer dünnen Schicht aus Ölsäure umgeben (nicht gezeigt).

In **Fig.1B** ist der Betriebszustand des Behälters 100 gezeigt, nachdem unter Verwendung eines CVD-Verfahrens Kohlenstoffnanoröhren 110 in die Suspension eingefüllt worden sind. Die Kohlenstoffnanoröhren 110 sind entlang des größten Teils ihrer Länge mit einer Schutzschicht (nicht gezeigt) aus einem Photolack umgeben, lediglich in einem Umgebungsbereich von einem Endabschnitt der Kohlenstoffnanoröhren 110 sind die Kohlenstoffnanoröhren 110 von der Schutzschicht frei. Nach Einfüllen der teilweise mit der Schutzschicht bedeckten Kohlenstoffnanoröhren 110 in die Suspension aus Toluol 101

und Eisen-Clustern 102 lagern sich Eisen-Cluster 102 nur an denjenigen Stellen der Kohlenstoffnanoröhren 110 an, an denen diese von der Schutzschicht frei sind. Anschaulich dient der Ölsäuremantel, von welchem die Eisen-Cluster 102 umgeben
 5 sind, als Haftschicht zum Anhaften der Eisen-Cluster 102 an die Kohlenstoffnanoröhren 110. Dadurch ist es ermöglicht, dass nur an räumlich definierten Stellen der Kohlenstoffnanoröhren Eisen-Cluster 102 als Katalysatormaterial-Spots zum Katalysieren eines
 10 nachfolgenden Ausbildens zweiter Kohlenstoffnanoröhren angelagert werden.

In einem weiteren Verfahrensschritt werden die Komplexe aus Eisen-Clustern 102 und Kohlenstoffnanoröhren 110 von dem
 15 Lösungsmittel 101 getrennt und in Dimethylformamid 201 resuspendiert.

Im Weiteren wird bezugnehmend auf die in den Fig.2A bis Fig.2C gezeigten Schichtenfolgen beschrieben, wie unter
 20 Verwendung der resuspendierten und mit Eisen-Clustern 102 versehenen Kohlenstoffnanoröhren 110 eine Kohlenstoffnanoröhren-Anordnung gemäß einem bevorzugten Ausführungsbeispiel der Erfindung hergestellt wird.

Die in **Fig.2A** gezeigte Schichtenfolge 200 ist gebildet aus einem Silizium-Substrat 202, in welchem ein integrierter Schaltkreis 203 ausgebildet ist. In einem Kontaktloch in dem Silizium-Substrat 202 ist ein elektrisch leitfähiges Kopplungsmittel 204 ausgebildet. Auf der Oberfläche des
 30 Silizium-Substrats 202 ist eine Photoresist-Schicht 205 aufgebracht und unter Verwendung eines Lithographie- und eines Ätz-Verfahrens gemeinsam mit dem Silizium-Substrat 202 zum Ausbilden des Kontaktlochs geätzt. Die Photoresist-Schicht 205 ist aus einem derartigen Material gewählt, dass
 35 Kohlenstoffnanoröhren sich an diesem Material nicht oder nur schlecht anlagern. Mittels einer Mikropipette wird auf das Kontaktloch der Schichtenfolge 200 ein Tropfen der Suspension

aus Dimethylformamid 201 und der mit dem Eisen-Cluster 102 versehenen Kohlenstoffnanoröhre 110 aufgebracht. Die Kohlenstoffnanoröhre 110 wird vertikal in dem Kontaktloch orientiert und mit dem elektrisch leitfähigen Kopplungsmittel 5 204 zum Ankoppeln an den integrierten Schaltkreis 303 gebunden.

Um die in **Fig.2B** gezeigte Schichtenfolge 210 zu erhalten, wird das Dimethylformamid-Material 201 mittels Trocknens 10 entfernt. Ferner wird unter Verwendung eines geeigneten Ätz-Verfahrens das Material der Photoresist-Schicht 205 entfernt. Das Ätz-Verfahren ist ein selektives Ätz-Verfahren, das derart gewählt wird, dass infolge des Ätzens zwar die Photoresist-Schicht 205, nicht aber die Kohlenstoffnanoröhre 15 110 samt Katalysatormaterial-Spot 102 entfernt wird.

Um die in **Fig.2C** gezeigte Kohlenstoffnanoröhren-Anordnung 220 gemäß dem bevorzugten Ausführungsbeispiel der Erfindung zu erhalten, wird die Schichtenfolge 210 in einem Reaktionsofen 20 einem CVD-Verfahrensschritt ("Chemical Vapour Deposition") unterzogen, in dem bei 700°C Azetylen-Material unter reduziertem Druck in die Verfahrenskammer eingeleitet wird. Dadurch bilden sich ausgehend von dem Eisen-Cluster 102 als Katalysatormaterial-Spot zusätzliche Kohlenstoffnanoröhren 25 221. Damit ist eine räumlich definierte Verzweigung von Kohlenstoffnanoröhren realisiert.

Im Weiteren werden bezugnehmend auf Fig.3A bis Fig.3C elektronenmikroskopische Aufnahmen von Kohlenstoffnanoröhren- 30 Anordnungen gemäß bevorzugten Ausführungsbeispielen der Erfindung beschrieben.

In der Elektronen-Mikroskopaufnahme 300 aus **Fig.3A** ist eine primäre Kohlenstoffnanoröhre 301 gezeigt, an der ein 35 Katalysatormaterial-Spot 302 ausgebildet ist. Ausgehend von diesem Katalysatormaterial-Spot 302 aus Eisen-Material ist

eine Verzweigung von sekundären Kohlenstoffnanoröhren 303 zu erkennen.

In **Fig.3B** ist eine Elektronenmikroskop-Aufnahme 310 mit
5 besonders großem Vergrößerungsfaktor dargestellt, in der eine
primäre Kohlenstoffnanoröhre 311 gezeigt ist. Ausgehend von
Katalysatormaterial-Spots 312 an der primären
Kohlenstoffnanoröhre 321 sind sekundäre Kohlenstoffnanoröhren
323 gezeigt.

10

Fig.3C zeigt noch eine andere Elektronenmikroskop-Aufnahme
320, bei der ausgehend von einem Katalysatormaterial-Spot 322
an einer primären Kohlenstoffnanoröhre 321 eine sekundäre
Kohlenstoffnanoröhre 323 aufgewachsen ist.

15

In diesem Dokument sind folgende Veröffentlichungen zitiert:

- [1] Harris, PJF (1999) "Carbon Nanotubes and Related Structures - New Materials for the Twenty-first Century.", Cambridge University Press, Cambridge. S. 1 to 15, 111 to 155
- [2] Li, J, Papadopoulos, C Xu, J (1999) "Nanoelectronics: Growing Y-junction carbon nanotubes", Nature 402:253-254
- [3] Cheung, CL, Kurtz, A, Park, H, Lieber, CM (2002) "Diameter-Controlled Synthesis of Carbon Nanotubes", JPhysChemB 106:2429-2433
- [4] Murray, CB, Sun, S, Doyle, H, Betley, T "Monodispersive 3d Transition-Metal (Co, Ni, Fe) Nanoparticles and Their Assembly into Nanoparticle Superlattices", MRS Bulletin, December 2001
- [5] Cao, A, Zhang, X, Xu, C, Liang, J, Wu, D, Wei, B (2000) "Carbon nanotube dendrites: Availability and their growth model", Materials Research Bulletin 36:2519-2523
- [6] Sun, LF, Liu, ZQ, Ma, VC, Tang, DS, Zhou, WY, Zou, XP, Li, YB, Lin, JY, Tan, KL, Xie, SS (2001) "Growth of nanofibers array under magnetic force by chemical vapor deposition", Chemical Physics Letters 336:392-396
- [7] Zhu, H, Ci, L, Xu, C, Liang, J, Wu, D (2002) "Growth mechanism of Y-junction carbon nanotubes", Diamond and Related Materials 11:1349-1352
- [8] Gan, B, Ahn, J, Zhang, Q, Rusli, Yoon, SF, Yu, J, Huang, QF, Chew, K, Ligatchev, VA, Zhang, XB, Li, WZ (2001)

18

"Y-junction carbon nanotubes grown by in situ
evaporated copper catalyst", Chemical Physics Letters
333:23-28

Patentansprüche:

1. Verfahren zum Herstellen einer Nanoelement-Anordnung,
bei dem

- 5 • zunächst ein erstes Nanoelement gebildet wird
- das erste Nanoelement anschließend in mindestens einem vorgegebenen Bereich mit Katalysatormaterial zum Katalysieren des Aufwachsens von Nanoelementen bedeckt wird; und
- 10 • auf dem Katalysatormaterial mindestens ein zweites Nanoelement aufgewachsen wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1,
bei dem das Katalysatormaterial auf dem ersten Nanoelement in
15 Gestalt von mindestens einem Cluster aufgebracht wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2,
bei dem das Katalysatormaterial auf dem ersten Nanoelement
aufgebracht wird, indem das erste Nanoelement mit einer
20 Suspension mit Clustern aus Katalysatormaterial in Wirkkontakt gebracht wird und nachfolgend das erste Nanoelement mit mindestens einem daran angelagerten Cluster aus der Suspension entfernt wird.

25 4. Verfahren nach Anspruch 3,
bei dem das erste Nanoelement mit dem mindestens einen daran angelagerten Cluster resuspendiert und auf einem Substrat aufgebracht wird.

30 5. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 4,
bei dem das erste Nanoelement mit mindestens einem daran angelagerten Cluster einem Verfahrensschritt zum Ausbilden des mindestens einen zweiten Nanoelements unterzogen wird derart, dass das mindestens eine zweite Nanoelement an dem
35 mindestens einem Cluster aufgewachsen wird.

6. Verfahren nach Anspruch 5,

bei dem zum Ausbilden des mindestens einen zweiten Nanoelements ein Chemical-Vapour-Deposition-Verfahren eingesetzt wird.

- 5 7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6,
bei dem das Katalysatormaterial zwischen dem ersten und dem
mindestens einen zweiten Nanoelement vernickelt wird.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7,
10 bei dem ein Teilbereich des ersten Nanoelements mit einer
Schutzschicht bedeckt wird, die von einer für das Aufwachsen
von Nanoelementen katalytischen Wirkung frei ist.
9. Verfahren nach Anspruch 8,
15 bei dem als Schutzschicht
 - Lack;
 - Tensid;
 - ein organisches Material;
 - ein oxidiertes Material; oder
 - 20 • ein von einer für das Aufwachsen von Nanoelementen
katalytischen Wirkung freies Metall
verwendet wird.
10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9,
25 bei dem als Katalysatormaterial
 - Eisen
 - Kobalt
 - Nickel und/oder
 - eine Legierung dieser Metalle mit Aluminium, Titan,
 - 30 Molybdän und Platin
verwendet wird.
11. Nanoelement-Anordnung
 - mit einem ersten Nanoelement, das in mindestens einem
 - 35 vorgegebenen Bereich mit Katalysatormaterial zum
Katalysieren des Aufwachsens von Nanoelementen bedeckt
ist; und

- mit mindestens einem zweiten Nanoelement, das auf dem Katalysatormaterial aufgewachsen ist.

12. Nanoelement-Anordnung nach Anspruch 11,

- 5 bei der nur ein Teil des ersten Nanoelements mit Katalysatormaterial zum Katalysieren des Aufwachsens von Nanoelementen bedeckt ist.

13. Nanoelement-Anordnung nach Anspruch 11 oder 12,

- 10 bei der das erste Nanoelement in einer in einem Substrat eingebrachten Pore aufgewachsen ist.

14. Nanoelement-Anordnung nach Anspruch 13,

- 15 bei der das erste Nanoelement in der Pore auf einer Metallisierungsebene in dem Substrat aufgewachsen ist.

15. Nanoelement-Anordnung nach einem der Ansprüche 11 bis 14,

- 20 bei der das erste und/oder das mindestens eine zweite Nanoelement und/oder mindestens ein zusätzliches Nanoelement aufeinander und/oder nebeneinander aufgewachsen sind.

16. Nanoelement-Anordnung nach einem der Ansprüche 11 bis 15, bei der das erste und/oder das mindestens eine zweite Nanoelement

- 25 • eine Nanoröhre
• ein Bündel von Nanoröhren oder
• ein Nanostäbchen
aufweist.

17. Nanoelement-Anordnung nach Anspruch 16, bei der das Nanostäbchen

- 30 • Silizium
• Germanium
• Indiumphosphid
35 • Galliumnitrid
• Galliumarsenid
• Zirkoniumoxid und/oder

- ein Metall
aufweist.

18. Nanoelement-Anordnung nach Anspruch 16,

5 bei der die Nanoröhre

- eine Kohlenstoffnanoröhre
- eine Kohlenstoff-Bor-Nanoröhre
- eine Kohlenstoff-Stickstoff-Nanoröhre
- eine Wolframsulfid-Nanostruktur oder eine

10 • eine Chalkogenid-Nanoröhre
ist.

19. Nanoelement-Anordnung nach Anspruch 16,

bei der das erste und/oder das mindestens eine zweite

15 Nanoelement eine Kohlenstoffnanoröhre ist und bei der das
Katalysatormaterial

- Eisen
- Kobalt
- Nickel und/oder

20 • eine Legierung dieser Metalle mit Aluminium, Titan,
Molybdän und Platin
aufweist.

20. Nanoelement-Anordnung nach einem der Ansprüche 11 bis 19,

25 die einen integrierten Schaltkreis aufweist, der mit ersten
und/oder dem mindestens einen zweiten Nanoelement gekoppelt
ist.

21. Nanoelement-Anordnung nach einem der Ansprüche 11 bis 20,

30 bei der die Nanoelemente ein mehrfach verzweigtes Netzwerk
bilden.

Zusammenfassung

Verfahren zum Herstellen einer Nanoelement-Anordnung und Nanoelement-Anordnung

5

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Herstellen einer Nanoelement-Anordnung und eine Nanoelement-Anordnung. Bei dem Verfahren zum Herstellen einer Nanoelement-Anordnung wird ein erstes Nanoelement zumindest teilweise mit

10

Katalysatormaterial zum Katalysieren des Aufwachsens von Nanoelementen bedeckt. Ferner wird auf dem Katalysatormaterial mindestens ein zweites Nanoelement aufgewachsen.